

УДК 622.692.4

## **МЕТОД І СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТІНКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ**

*Л.М. Заміховський, Х.В. Паньків, Ю.В. Паньків, І.Р. Дорофей*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, Україна, тел. (03422) 48000,  
e-mail: ktsu@nuing.edu.ua*

*Пропонується метод та система оцінки зміни НДС стінки резервуарів вертикальних сталевих (РВС) за даними про переміщення точок її поверхні без визначення сил та навантажень, що діють на резервуар, з використанням згладжуючих сплайнів для відтворення стінки РВС за координатами окремих точок. Останнє дає змогу зменшити вплив похибки вимірювання з врахуванням просторового переміщення стінки, дефектів форми стінки та впливу зварних з'єднань РВС. Наведено результати експериментальних досліджень та імітаційного моделювання з використанням програмного пакету SolidWorks, які підтверджують адекватність запропонованої математичної моделі та розробленого програмного забезпечення. Розроблено систему для безконтактного дистанційного сканування стінки резервуара з використанням лазера, яка в комплексі з розробленим програмним забезпеченням дає змогу методом непрямих вимірювань визначити координати стінки РВС. Розроблено методичне, технічне та програмне забезпечення для реалізації запропонованого методу.*

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, вертикальний сталевий циліндричний резервуар, переміщення, координати, згладжуючий сплайн, лазерний профілемір, дистанційне сканування.

*Предлагается метод и система контроля изменения НДС стенки РВС по данным о перемещении точек ее поверхности без определения сил и нагрузок, действующих на резервуар, с использованием сглаживающих сплайнов для воспроизведения стенки РВС по координатам отдельных точек. Последнее позволяет уменьшить влияние погрешности измерения с учетом пространственного перемещения стенки, дефектов формы стенки и влияния сварных соединений РВС. Приведены результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования с использованием программного пакета SolidWorks, подтверждающие адекватность предложенной математической модели и разработанного программного обеспечения. Разработана система для бесконтактного дистанционного сканирования стенки резервуара с использованием лазера, которая в комплексе с разработанным программным обеспечением, позволяет методом косвенных измерений определить координаты стенки РВС. Разработано методическое, техническое и программное обеспечение для реализации предложенного метода.*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, вертикальный стальной цилиндрический резервуар, перемещения, координаты, сглаживающий сплайн, лазерный профиломер, дистанционное сканирование.

*This article is dedicated to the method and system for assessing the changes in the tensely-deformed state of the walls of vertical cylindrical steel tank with moving points of its surface, without all the forces and loads acting on the reservoir using smoothing splines for reproduction wall of the tanks the coordinates of individual points, which can reduce the impact of measurement error, taking into account spatial moving wall, defects form of the wall and impact welds. There are results of experimental studies and simulation using the software package SolidWorks, that confirming the adequacy of the proposed mathematical model and the developed software. There is a system for remote non-contact scanning tank wall using a laser, which, in combination with the developed software that allows the indirect measurement to determine the coordinates of the wall of the VST. And there is methodical, hardware and software to implement the proposed method.*

**Keywords:** tensely-deformed state, vertical cylindrical steel tank, movement, coordinates, smoothing spline, laser profilometer, remote scanning.

Нафтобази на території України та інших країн укомплектовані, в основному, сталевими вертикальними циліндричними резервуарами (РВС) різних розмірів. Сьогодні більшість з них перебуває в експлуатації 30–40 років і вже суттєво спрацьована. РВС є об'єктами підвищеної небезпеки, оскільки вони працюють у складному напруженому стані. На них діють: тиск речовини, що зберігається, температура, вітер, снігове навантаження, осідання фундаменту тощо. Одним з основних параметрів для визначення залишкового ресурсу резервуарів є інформація про їх напружено-деформований стан (НДС), зокрема розподіл напружень в матеріалі стінки резервуара.

Існуючі методи визначення НДС вимагають врахування всіх сил та навантажень, які діють на резервуар (що в більшості випадків є можливим лише з великим наближенням), прямого контакту з поверхнею резервуара, або ж є непридатними для великогабаритних об'єктів, якими є РВС, тому розроблення методів і засобів оцінки НДС матеріалу стінки РВС є актуальною науково-технічною проблемою, яка має важливе народногосподарське значення.

Аналіз існуючих методів та приладів контролю НДС резервуара свідчить, що їм притаманні суттєві недоліки, а саме:

- необхідність підготовки контрольованої поверхні;

- складність визначення положення давачів по відношенню до дії максимальних навантажень;

- залежність результатів контролю від способів і умов вимірювання;

- необхідність безпосереднього контактування приладів з контрольованою поверхнею. Зазвичай отримуються дані тільки про одну з компонент тензора напружень.

В статті розглядаються математичні методи, що дають змогу одержати адекватну картину НДС матеріалу стінки резервуара лише лише за умови врахування всіх впливів та навантажень, що діють на резервуар. У зв'язку з цим запропоновано розглядати процес зміни НДС стінки РВС в межах теорії пружності. Також розроблено основні теоретичні положення, на яких ґрунтується запропонований вдосконалений метод контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за просторовим переміщенням точок її поверхні [1].

При побудові математичної моделі процесу деформування матеріалу стінки РВС робиться припущення про те, що її можна розглядати як пружно деформоване ізотропне тіло. Стінка резервуара моделюється у вигляді циліндра із заданими діаметром, висотою та товщиною кожного пояса і відтак будується радіус-вектор кожної точки її поверхні в циліндричній системі координат:

$$\vec{r} = \begin{cases} x = s, & 0 \leq s \leq L, \\ y = r \cos \varphi, & 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \\ z = r \sin \varphi; & R_{\min} \leq r \leq R_{\max}; \end{cases} \quad (1)$$

де  $s, r, \varphi$  – циліндричні координати;

$L$  – висота резервуара;

$R_{\min}, R_{\max}$  – мінімальна та максимальна відстань від центра до внутрішньої та зовнішньої стінки резервуара відповідно.

Переміщення точок поверхні стінки резервуара розглядаються в трьох напрямках:

$w_1(r, \varphi, s)$  – переміщення по радіусу,

$w_2(r, \varphi, s)$  – переміщення по куту і

$w_3(r, \varphi, s)$  – переміщення по висоті резервуара.

Далі знаходять компоненти векторів [2]:

$$\vec{\varepsilon}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_i}, \quad (2)$$

де  $x_1 = r, x_2 = \varphi$  і  $x_3 = s$ .

За ними розраховують компоненти метричних тензорів [2]:

$$g_{ij} = \vec{\varepsilon}_i \cdot \vec{\varepsilon}_j. \quad (3)$$

За відомими компонентами метричних тензорів знаходять компоненти тензорів деформацій [2]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i w_j(r, \varphi, s) + \nabla_j w_i(r, \varphi, s)). \quad (4)$$

Тут коваріантні похідні контраваріантних компонент  $\nabla_i w_j$  визначаються за формулою:

$$\nabla_i w_j(r, \varphi, s) = \frac{\partial w_j(r, \varphi, s)}{\partial x_i} - \sum_k w_k(r, \varphi, s) \Gamma_{ij}^k, \quad (5)$$

де  $\Gamma_{ij}^k$  – символи Кристофеля II роду [2].

Потім знаходять компоненти тензора зміни напружень з використанням закону Гука для пружнодеформованого тіла, який для ізотропного тіла записується у формі [2]:

$$\Delta \sigma^{ij} = \lambda I_1(\varepsilon) g^{ij} + 2\mu \varepsilon^{ij}, \quad (6)$$

де  $g^{ij}$  – компоненти матриці, оберненої до матриці;

$\varepsilon^{ij}$  – компоненти матриці, оберненої до матриці  $\varepsilon_{ij}$ ;

$\lambda$  та  $\mu$  – параметри Ламе;

$I_1(\varepsilon)$  – величина першого інваріанта тензора деформацій.

Фізичні компоненти тензора напружень визначаються з врахуванням того, що вектори базису  $\mathcal{E}_1$  і  $\mathcal{E}_3$  мають одиничну довжину, а довжина вектора  $\mathcal{E}_2$  становить  $r$  з врахуванням напружень в початковий момент часу.

За компонентами тензора напружень обчислюється інтенсивність напружень [2]:

$$\sigma_i = \left( (\sigma_\phi^{11} - \sigma_\phi^{22})^2 + (\sigma_\phi^{22} - \sigma_\phi^{33})^2 + (\sigma_\phi^{33} - \sigma_\phi^{11})^2 + 6((\sigma_\phi^{12})^2 + (\sigma_\phi^{23})^2 + (\sigma_\phi^{31})^2) \cdot 0,5 \right)^{1/2}, \quad (7)$$

де  $\sigma_\phi^{ij}$  – фізичні компоненти тензора напружень.

Вона використовується для перевірки критерію пластичності за Мізесом [3, 4]:

$$\sigma_i = \sigma_{\text{тек}}, \quad (8)$$

де  $\sigma_{\text{тек}}$  – межа плинності матеріалу.

Для перевірки розробленої математичної моделі було проведено розрахунок НДС для відомої задачі Ламе [2, 5]. Задача Ламе полягає в визначенні напружень та деформацій круглої циліндричної труби заданої товщини з пружного ізотропного матеріалу за умови, що вона перебуває під дією внутрішнього та зовнішнього тисків за постійної температури, яка відповідає відсутності “температурних” напружень при відсутності деформацій. Кінці труби закріплені так, що переміщення вздовж її осі відсутні, а переміщення в поперечному напрямку нічим не обмежені. За початковий стан приймається стан, коли внутрішній та зовнішній тиски рівні нулю, тобто деформації і напруження в стінках труби відсутні. У такий спосіб можливо промодельовати «дихання» резервуара або зміну НДС при наповненні та опорожненні, тобто коли переміщення поверхні стінки резервуара відбувається лише по радіусу. В цьому випадку:

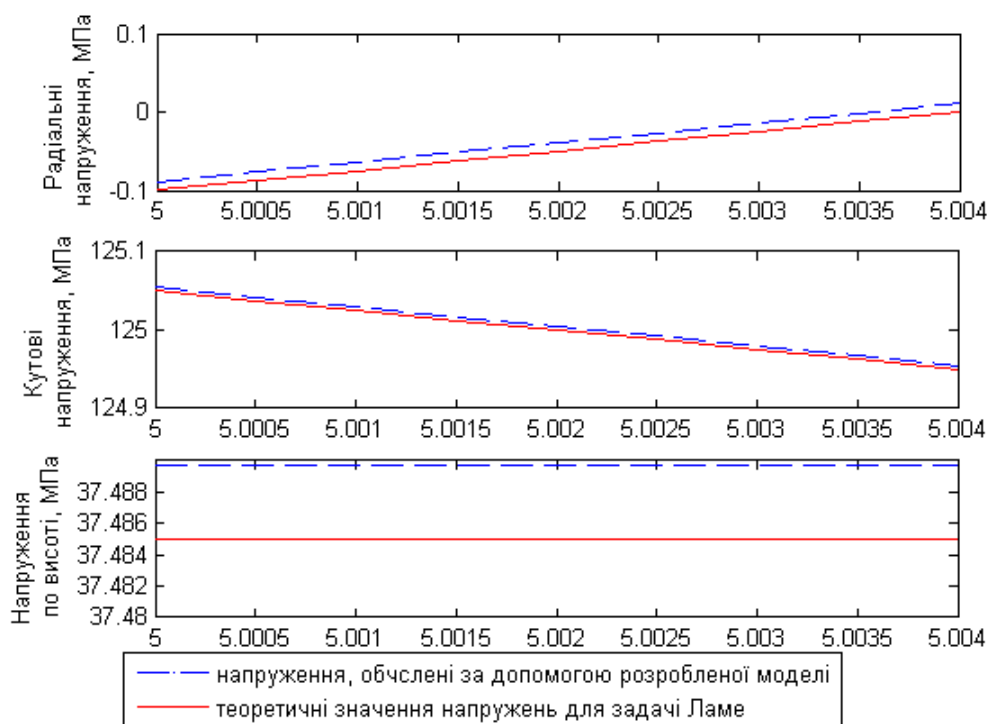


Рисунок 1 – Розподіл нормальних напружень в стінці резервуара

$$w_1(r) = A * r + \frac{B}{r}; \quad (9)$$

$$w_2(r) = w_3(r) = 0.$$

Тут  $A$  та  $B$  – константи, які визначаються за формулами [2]:

$$A = \frac{a^2 p_a - b^2 p_b}{2(\lambda + \mu)(b^2 - a^2)}, \quad (10)$$

$$B = \frac{(p_a - p_b)a^2 b^2}{(b^2 - a^2)2\mu},$$

де  $a$  і  $b$  – внутрішній та зовнішній радіуси резервуара відповідно;

$p_a$  і  $p_b$  – відповідно внутрішній та зовнішній тиски за сталої температури.

Стінку РВС в початковий момент часу було промодельовано ідеальним циліндром радіусом 5 м, висотою 5 м та товщиною 4 мм. В початковий момент часу резервуар знаходиться в ненапруженому стані. В контрольний момент часу на резервуар діє тільки внутрішній тиск 0,1 МПа.

За результатами проведених розрахунків можна зробити висновок, що тангенціальні напруження рівні нулю, а максимальні значення мають нормальні кутові напруження розтягу  $\sigma^{22}$  (125,05 МПа) на внутрішній поверхні стінки резервуара (рис. 1). Напруження розтягу по висоті  $\sigma^{33}$  сягають близько 37,49 МПа і не змінюються по товщині стінки. Оскільки нормальні радіальні напруження  $\sigma^{11}$  від'ємні (-0,09 МПа на внутрішній поверхні стінки), то вздовж радіуса резервуар стискається.

Одержані результати збігаються з відомими результатами задачі Ламе (абсолютна похибка становить менше 0,01 МПа), отже розроблена математична модель є адекватною.

Розроблена математична модель дає змогу розраховувати зміну тензорів напружень в будь-якій точці стінки РВС. Визначивши значення зміни напружень та деформацій в будь-якій точці матеріалу стінки резервуара, можна зробити висновок про його надійність і залишковий ресурс, необхідність заміни або ремонту.

Для врахування впливу зварних з'єднань на НДС пропонується в місцях зварних швів задавати інші фізичні параметри матеріалу (модуль Юнга і коефіцієнт Пуасона) [6]. Матеріал стінки резервуара розглядається як макроскопічно неоднорідний і використовується детерміністичний підхід: вважається відомою залежність від циліндричних координат модуля Юнга  $E(r, \varphi, s)$  і коефіцієнта Пуасона  $\sigma(r, \varphi, s)$ . Тоді параметри Ламе в законі Гука для пружнодеформованого тіла також будуть залежати від циліндричних координат. Використовувати ефективний кінетичний коефіцієнт не є доцільним, оскільки потрібно визначити напруження в кожній точці стінки резервуара, а не його усереднене значення. Параметри матеріалу зварних з'єднань рекомендується визначати з врахуванням коефіцієнта 0,8 для ручної зварки, та 0,9 – для автоматичної. Нехай в розглянутій імітаційній моделі горизонтальний зварний шов знаходиться на висоті 2 м. В цьому випадку переміщення по радіусу залежать від висоти резервуара, що зумовлено наявністю зварного шва, і не залежать від кута. Залежність нормальних напружень від висоти стінки РВС наведено на рисунку 2, де видно, що на висоті 2 м

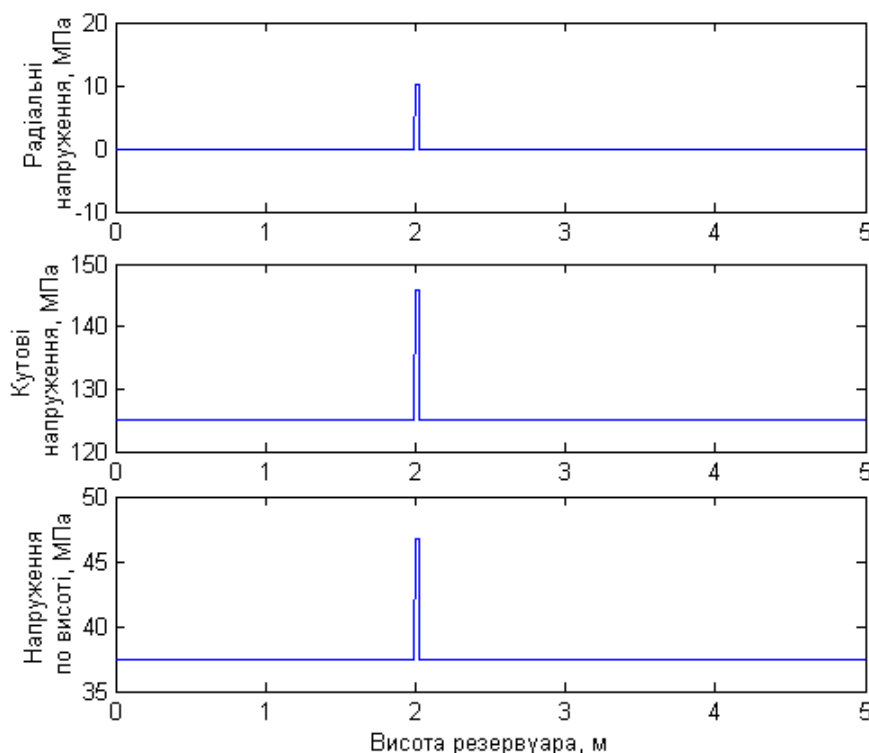


Рисунок 2 – Розподіл напружень на внутрішній поверхні стінки по висоті резервуара

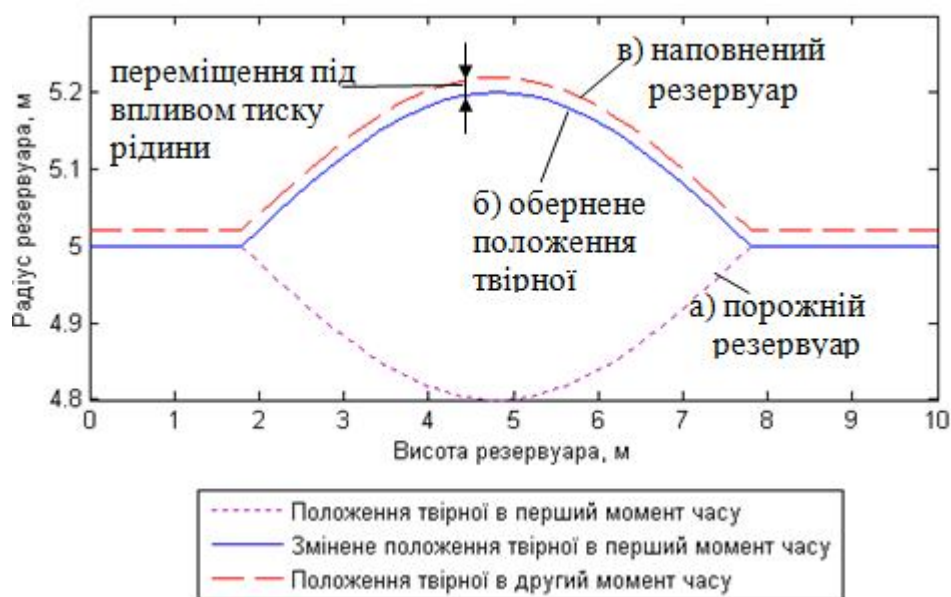


Рисунок 3 – Положення твірної стінки резервуара з “хлопавкою”

напруження сягають більших значень, що зумовлено наявністю на цій висоті зварного з'єднання.

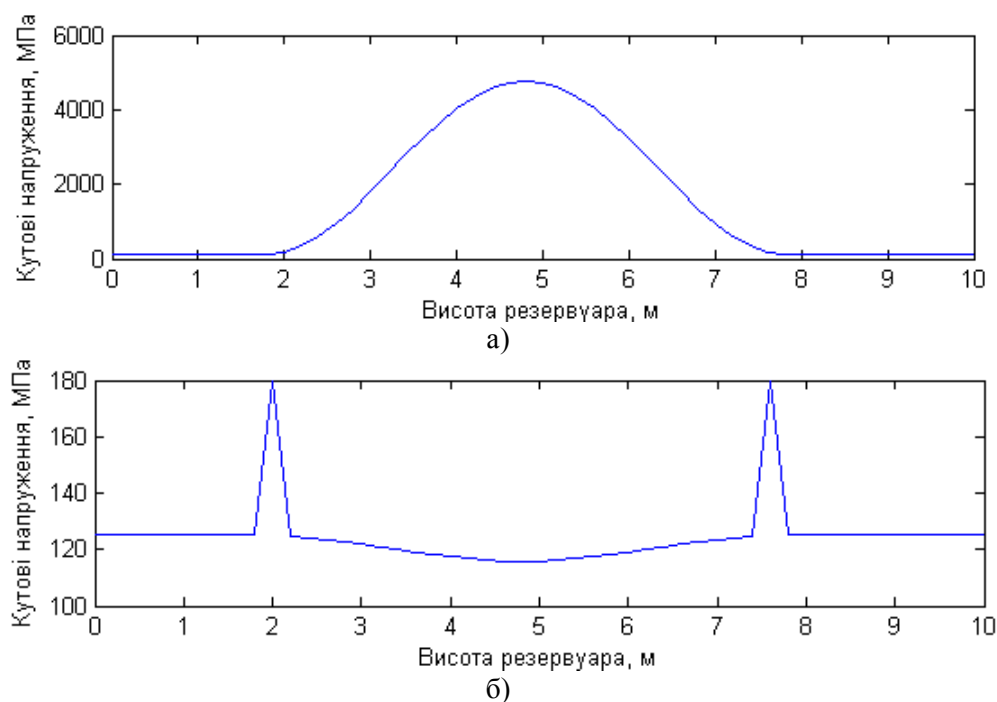
“Хлопавками” називають зони стінки чи днища РВС, в яких при зміні навантажень відбувається зміна форми з опуклості на вм'ятину або навпаки. Наявність “хлопавки” впливає на визначення зміни НДС матеріалу стінки РВС за переміщеннями точок поверхні, оскільки при зміні їх форми з вм'ятини на опуклість можна зафіксувати значні переміщення, які, однак, не викликають зміни напружень.

Для врахування впливу переміщень “хлопавок” запропоновано проводити попередню

обробку переміщень, виміряних в перший момент часу. Обробка полягає в виявленні зони “хлопавки” за зміною знаку другої похідної координат поверхні стінки по твірній в перший та другий моменти часу і обертанні “хлопавки” так, щоб друга похідна стала такого ж самого знаку, як в другий момент часу.

Для перевірки запропонованого підходу проведено розрахунок для ідеальної циліндричної поверхні стінки. Положення стінки з “хлопавкою” в два моменти часу наведено на рисунку 3.

Нехай в перший момент часу у ненаповненому резервуарі “хлопавка” має форму вм'яти-



а) без врахування впливу “хлопавки”; б) з врахуванням впливу “хлопавки”  
Рисунок 4 – Розподіл інтенсивності напружень по поверхні матеріалу стінки

ни, тому профіль її стінки має вигляд, зображений на рисунку 3,а. Якщо резервуар наповнити, профіль його стінки набуде положення, зображеного на рисунку 3,в. Однак, такі великі переміщення не будуть адекватно відображати зміну НДС, реальне переміщення твірної стінки під впливом тиску рідини буде від положення (рис.3,б) до (рис.3,в), оскільки при переміщенні твірної з положення (а) в положення (б) напруження не змінюватимуться.

З метою врахування впливу “хлопавки” необхідно перетворити координати точок стінки РВС в ділянці “хлопавки” в перший момент часу так, щоб друга похідна стала такого самого знаку, як в другий момент часу. Тобто “хлопавка” уже змінила своє положення з вм’ятини (а) на опуклість (б) (або навпаки), але ще не набула положення, яке відповідає другому моменту часу (в). Зміна положення стінки з проміжного стану (б) у кінцевий стан (в) зумовлена впливом тиску рідини, що зберігається. Для компенсації великих переміщень при так званому ненавантаженому інвертуванні “хлопавки” (а-б) необхідно визначити межі зони “хлопавки”, тобто точки, де друга похідна від радіальних координат точок стінки по висоті буде рівна нулю або змінювати знак. Через кінці зони “хлопавки” будуватиметься пряма, симетрична до якої обертаються координати точок поверхні стінки РВС.

Для перевірки запропонованого підходу проведено розрахунок для ідеальної циліндричної поверхні стінки.

Залежність кутових напружень від висоти резервуара для змодельованої “хлопавки” з використанням скоригованих значень переміщень зображено на рисунку 4.

Як видно з рисунку 4, напруження без врахування впливу “хлопавки” значно перевищують межу пластичності сталі і не відповідають реальному процесу деформування.

Дані про переміщення точок поверхні стінки резервуара задаються дискретно, що вимагає застосування інтерполяційних та апроксимаційних процедур [7]. Для відтворення переміщень поверхні стінки резервуара можна застосувати апроксимацію із згладжуючими сплайнами, що дає змогу зменшити вплив похибки вимірювання. Значення сплайнів, що обчислюються за різними координатами повинні збігатися в кожній точці. Тому для апроксимації переміщень в залежності від полярного кута використовується згладжуючий періодичний сплайн, а від висоти - кубічний сплайн, за вузлові точки якого приймаються згладжені в залежності від кута переміщення.

Згладжування полягає у введенні в функціонал, що мінімізується, ще одного доданку, який і буде характеризувати відхилення від заданих точок. Функціонал буде мати вигляд [8]:

$$\int_a^b g''(x)^2 dx + \sum p_k (g(x_k) - f_k)^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $p_k$  – вагові коефіцієнти, які характеризують ступінь відхилення сплайну від заданих точок.

Чим більший ваговий коефіцієнт певної точки, тим ближче до неї буде проходити згладжуючий сплайн і тим самим буде більш схожим до кубічного інтерполяційного сплайну.

Для визначення вагових коефіцієнтів  $p_k$ , які характеризують ступінь відхилення сплайну від



заданих точок, використовується напівобернений метод для визначення зміни напружень в залежності від переміщень окремо по кожному з напрямків. Він полягає в тому, що за фізичними компонентами тензора зміни напружень з урахуванням квазістаціонарності процесу деформування перевіряється виконання умов рівноваги, які без урахування масових сил записуються у вигляді:

$$\sum_{j=1}^3 \nabla_j \sigma_{\phi}^{ij} = 0. \quad (12)$$

Для рівнянь системи (12) шляхом підстановки фізичних компонент тензора напружень одержуються функції  $F_i(r, \varphi, s)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , які є нев'язками відповідно першого, другого та третього рівнянь системи (12): Далі знаходяться величини:

$$\Delta_i = \int_V F_i(s, \varphi, r) dV \approx \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\pi(R_3^2 - R_{\text{вн}}^2)}{MN} LF_i(s_j, \varphi_L, R_3), \quad (13)$$

де  $V$  – об'єм стінки резервуара;

$M, N$  – кількість точок розбиття по позовжній та полярній координатах.

Після цього розв'язується задача безумовної мінімізації функції багатьох змінних  $\Delta$  за методом Нелдера-Міда [9]:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\Delta_i)^2}. \quad (14)$$

За обчисленими ваговими коефіцієнтами  $p_k$  будується згладжуючий періодичний сплайн за формулами. Для дослідження результатів використання згладжуючих сплайнів застосовується імітаційне моделювання з використанням задачі Ламе [2]. З метою моделювання похибки експериментальних вимірювань в кожній точці стінки резервуара визначаються переміщення:

$$\tilde{w}_l(r) = w_l(r) - \varepsilon(1-t) + \varepsilon t, \quad q = 1..3, \quad (15)$$

де  $\varepsilon$  – рівень точності вимірювання переміщень;

$t$  – випадкові числа, що генеруються на відріжку  $[0,1]$ .

Використання даних про переміщення, одержаних з похибкою, може призвести до фізично неадекватних результатів (рис. 5). Напруження, обчислені за даними про переміщення стінки резервуара, апроксимованих з використанням згладжуючих сплайнів, добре узгоджуються з точними даними аналітичного розрахунку відповідних напружень для задачі Ламе [2] (рис. 6). Відносна похибка становить 4,6 %. Якщо вимірювання координат стінки РВС проводиться з похибкою 1 мм, а радіус резервуара становить 10 м, то похибка обчислення напружень становить 21 МПа.

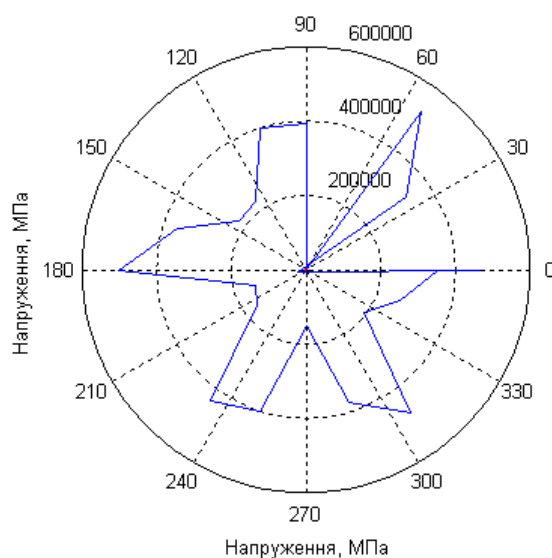


Рисунок 5 – Нормальні кутові напруження в перерізі стінки резервуара, обчислені за даними з похибкою (змінені на 300 000 МПа для відображення в додатній області)

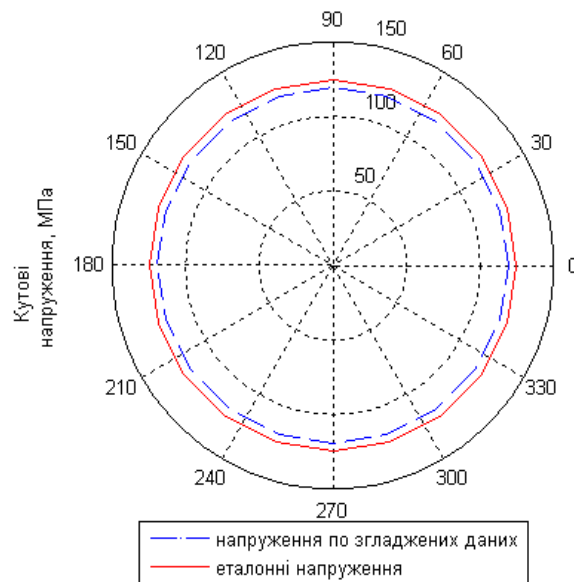
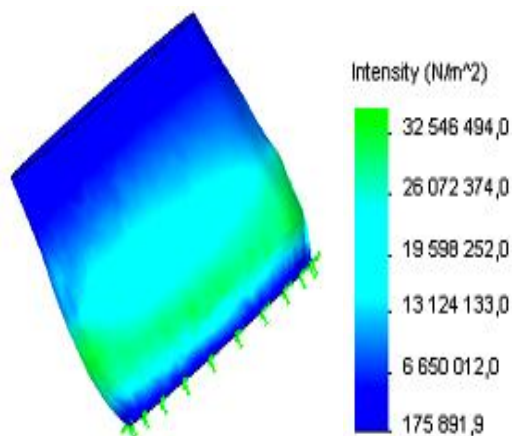


Рисунок 6 – Нормальні кутові напруження в перерізі резервуара, обчислені з використанням згладжуючих сплайнів

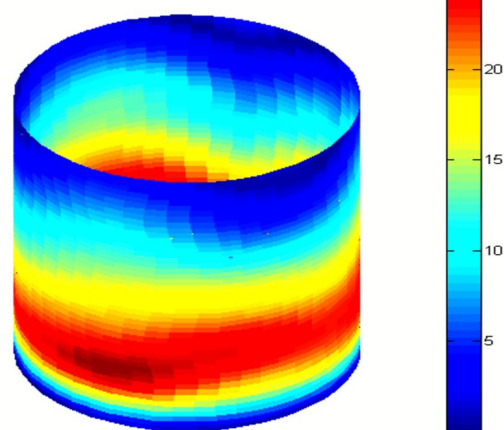
Для перевірки адекватності моделі та розробленого програмного забезпечення проводилося імітаційне моделювання за допомогою програмного комплексу SolidWorks, який базується на методів скінченних елементів (МСЕ). Для цього було побудовано оболонкову модель стінки резервуара висотою 10 м та радіусом 5 м із вмітиною з одного боку та опуклістю з протилежного боку. Стінка моделювалася як жорстко защемлена по нижньому краю. На стінку діяв тиск, який змінювався по висоті від 100000 Па до 0 Па, імітуючи таким чином тиск речовини.

Як матеріал стінки вибрано сталь AISI 1015 Steel, для якої модуль Юнга рівний  $2,05 \cdot 10^{11}$  Па, а коефіцієнт Пуасона – 0.29.



**Рисунок 7 – Розподіл інтенсивності напружень в матеріалі стінки резервуара, одержаних за допомогою програмного комплексу SolidWorks**

Розподіл напружень по поверхні стінки, МПа



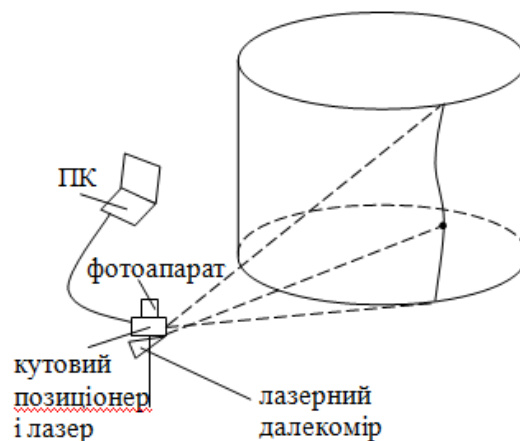
**Рисунок 8 – Розподіл інтенсивності напружень в матеріалі стінки резервуара, одержаних за допомогою розробленого програмного забезпечення**

Отримані при цьому переміщення було опрацьовано з використанням розробленого програмного забезпечення і проведено порівняння напружень, отриманих за допомогою програмного комплексу SolidWorks (рис. 7) з використанням МСЕ та за результатами роботи програми (рис. 8).

Максимальних значень інтенсивності напружень обчислених за допомогою розробленого програмного забезпечення рівні 27,6424 МПа, а одержаних в SolidWorks – 29,7899 МПа, сягають в зоні вм'ятини. Відносна похибка становить 7,2%, що свідчить про адекватність розроблених моделі та програми і можливість їх використання для оцінки зміни НДС стінок резервуарів.

Було розроблено систему для визначення координат точок поверхні стінки резервуара, яка проектує скануючу лінію лазера на стінку РВС і фотографує її твірну (рис. 9). Система складається з скануючого лазера, кутового позиціонера, лазерного далекоміра, фотоапарата та портативного комп'ютера (ПК) з необхідним програмним забезпеченням. За допомогою кутового позиціонера проводиться лазерна розгортка (скануюча лінія) зеленого кольору, яка проектується на стінку резервуара під певним кутом, що задається позиціонером. Проекція фотографується і за допомогою розробленого програмного забезпечення за отриманою фотографією визначаються координати точок твірної стінки резервуара. Для цього потрібно виміряти відстань від приладу до вимірюваної твірної. За допомогою вбудованого лазера червоного кольору на лазерній проекції твірної на заданій висоті позиціонується опорна точка, до якої і вимірюється відстань.

Дисторсією лінзи в сучасних фотоапаратах можна знехтувати зважаючи на сучасні досягнення в виготовленні об'єктивів та те, що найбільше дисторсія проявляється лише на краях зображення. Також в сучасних об'єктивах прак-

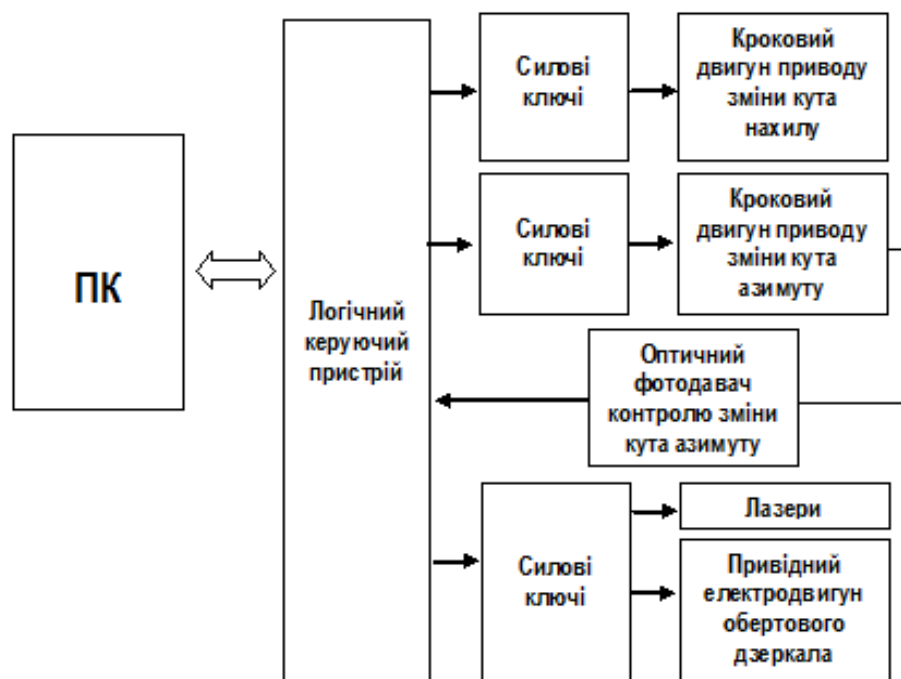


**Рисунок 9 – Система для визначення координат точок поверхні стінки резервуара**

тично відсутня хроматична аберация. Для визначення масштабу твірної на фотографії необхідно знати розмір матриці. Для фотоапарата, який використовувався в роботі, розмір матриці становить 6x8 мм, а максимальна роздільна здатність – 2616x3488 пікселів. Тобто мінімальний масштаб матриці становить 2,29 мкм/піксель, що з врахуванням фокусної відстані становить від 0,37 до 0,034 мкм/мм. Для визначення розміру об'єкта необхідно його розмір в пікселях помножити на відстань до об'єкта. При використанні іншого розширення фотоапарата масштаб необхідно перерахувати.

Враховуючи вимоги до системи для визначення координат точок поверхні стінки резервуара розроблено функціональну схему кутового позиціонера (рис. 10). Вимірювання відстані до резервуара здійснюється за допомогою професійного лазерного далекоміра Bosch DLE50 [10].

Оператор має можливість віддалено керувати кутовим позиціонером за допомогою ПК на якому запущено керуючу програму, що дає

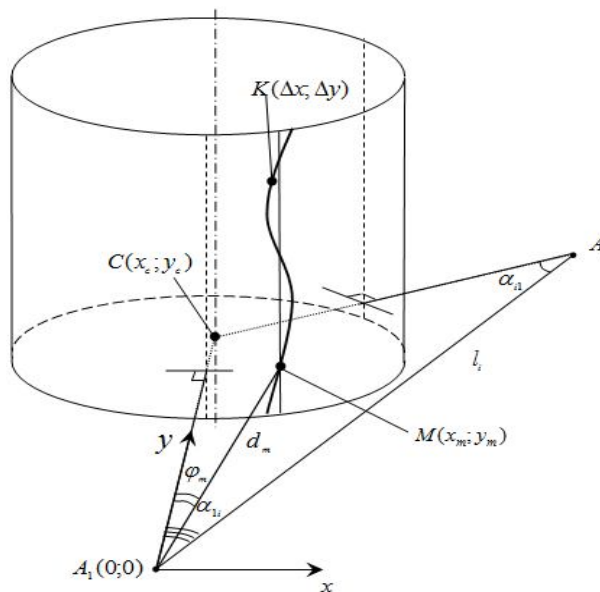


**Рисунок 10 – Функціональна схема кутового позиціонера системи визначення координат точок поверхні стінки резервуара**

змогу обмінюватися даними через інтерфейс паралельного порту Line Print Terminal (LPT). Після отримання та декодування команди оператора логічний керуючий пристрій через силові ключі подає напругу на реле включення лазера та привода обертового дзеркала пристрою формування скануючої лінії чи на обмотки відповідних крокових електродвигунів, які обертають платформу в заданому напрямі або позиціонують опорний лазерний промінь. На рух платформи реагує оптичний фотодавач, який передає сигнал зворотного зв'язку назад до ПК, яка, обробивши його, відображає фактичне положення платформи на моніторі.

Для визначення циліндричних координат точок поверхні стінки резервуара необхідно визначити координати опорної точки  $M$ , яка утворюється шляхом проектування червоної точки лазерного променя на стінку резервуара на заданій висоті. Для цього необхідно визначити відстань  $d_m$  від опори приладу до цієї точки та кут  $\varphi_m$ , на який повернеться лазер від нормалі до стінки резервуара (рис. 11). Перше положення кутового позиціонера приймається за початок координат. Вісь ординат направляють по нормалі до резервуара. Після того, як проведено всі вимірювання видимої з даного положення опори поверхні стінки резервуара, опора і кутовий позиціонер переносяться в наступне положення і вимірювання повторюються. Координати всіх точок переводяться в систему координат першого положення опори і визначаються координати осі резервуара. Після цього потрібно перерахувати координати всіх точок відносно осі резервуара і перевести координати всіх точок в циліндричну форму, для чого треба врахувати висоту, на яку піднята

опорна точка, і перенести початок координат  
вниз на цю відстань.

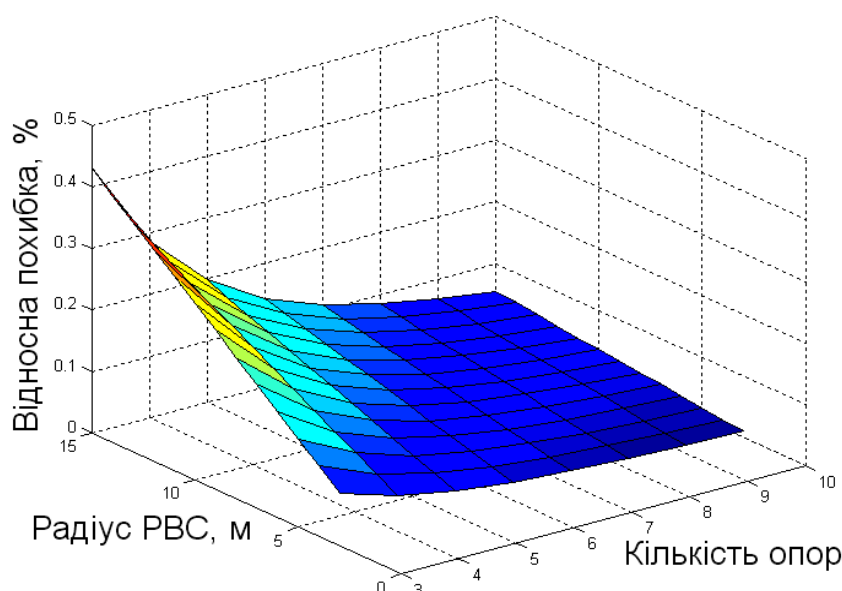


**Рисунок 11 – Система вимірювання  
циліндричних координат точок поверхні  
резервуара**

Для оцінки абсолютного значення НДС стінки резервуара, необхідно мати інформацію про його НДС при першому вимірюванні. Якщо прийняти за нульовий НДС резервуара при його введенні в експлуатацію, можна визначити зміну НДС у ході експлуатації. Також можна прийняти за початкове положення резервуар з ідеально циліндричною формою стінки з нульовим НДС.

Обробка фотографій, отриманих за допомогою розробленого методу, здійснюється в





**Рисунок 12 – Залежність похибки вимірювання координати стінки РВС від радіуса та кількості опор**

середовищі Matlab з використанням декореляційного розтягнення, розбивки фотографії за трьома кольорами, та бінаризація по кожному кольору окрема. Результатом обробки зображення є бінарний масив, де одиницями позначена проекція лазерного променя на твірну резервуара.

Декореляційне розтягнення покращує співвідношення кольорів на зображенні з урахуванням кореляційних залежностей. При перетворенні значень вихідних кольорів зображення діапазон відображення, в більшості випадків, збільшується. Інтенсивності кольорів кожного пікселя перетворюються у власний колірний простір з кореляційною матрицею, розтягуються, вирівнюються і трансформуються назад [11, 12].

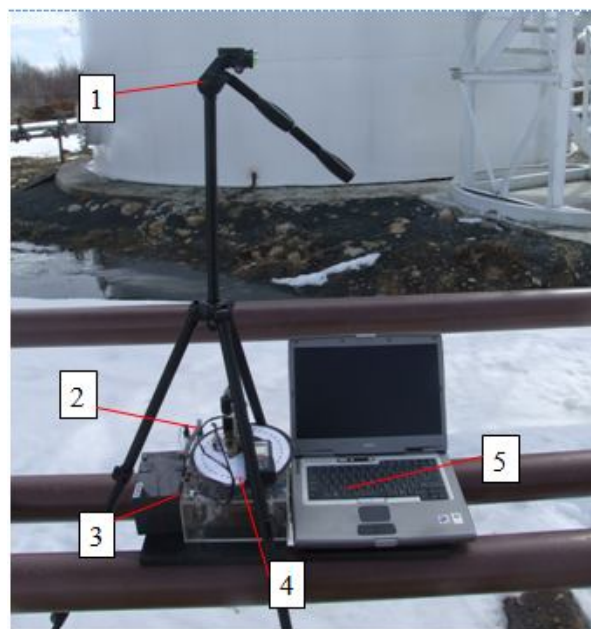
Бінаризація зображення полягає у перетворенні його пікселів в масив бінарних елементів: в «1», якщо інтенсивність кольору перевищує задане значення, і в «0» в протилежному випадку.

Розраховано ентропійне значення зведеної сумарної приведеної похибки приладу, яке становить 0,15%. Похибка вимірювання координат відносно опори буде визначатися як похибка непрямих вимірювань і залежатиме від радіуса резервуара та кількості точок вимірювання (рис. 12).

Як видно з рисунку 14, чим більший радіус резервуара, тим з більшої кількості опор необхідно проводити фотографування для забезпечення необхідного рівня точності.

Промислова апробація розробленої системи була проведена на РВС 400 №4 ГЗ №6 ЦППН НГВУ «Долина нафтогаз» (рис. 13). В результаті обробки отриманих фотографій за допомогою розробленого програмного забезпечення було отримано координати 5-ї твірної стінки РВС, виміряної з одного положення опори. Отримані значення порівнювалися з ре-

зультатами вимірювань відхилень 5-ї твірної стінки РВС від вертикалі за даними протоколу геометричного калібрування [13]. Математичне сподівання різниці між вимірюваннями за допомогою каретки та лазера дорівнює -0,33 мм, СКВ рівне 1,3 мм. Слід зауважити, що похибка обчислення координат стінки буде залежати від способу обробки фотографії: чим чіткіше буде виділена проекція твірної, тим точнішим буде результат.



1) фотоапарат; 2) скануючий лазер;  
3) кутовий позиціонер; 4) лазерний далекомір;  
5) ПК з необхідним програмним забезпеченням

**Рисунок 13 – Промислова апробація розробленої системи**

Для отримання чіткої фотографії розгортки лазерного променя на твірну резервуара рекомендовано застосовувати лазер з більшою потужністю випромінювання (500 мВт).

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу розроблення методу контролю зміни НДС матеріалу стінки РВС за переміщенням точок її поверхні. Вирішення цієї задачі має важливе значення, оскільки дає змогу оцінити зміну НДС стінки РВС без врахування всіх сил та навантажень, що діють на резервуар.

На основі проведеного аналізу відомих методів і засобів визначення напружено-деформованого стану резервуарів встановлено, що вони вимагають врахування всіх сил та навантажень, які діють на резервуар, прямого контакту з поверхнею резервуара, або ж є непридатними для великогабаритних об'єктів, якими є вертикальні сталеві циліндричні резервуари.

Розроблена математична модель та програмне забезпечення для оцінки зміни НДС РВС за переміщенням точок її поверхні враховує переміщення стінки в трьох напрямках, дефекти форми стінки та вплив зварних з'єднань.

Обґрунтовано використання згладжуючого кубічного сплайну для відтворення переміщень поверхні стінки резервуара по заданих координатах множини точок, що також дає змогу зменшити вплив похибки вимірювання. Похибка оцінки НДС при вимірюванні координат з похибкою 1 мм становить 21 МПа. Відносна похибка при моделюванні з використанням програмного пакету SolidWorks становить 7,2 %.

Створено систему для безконтактного визначення положення стінки резервуара з використанням лазерного сканера, яка в комплексі з розробленим програмним забезпеченням дає змогу автоматизувати процес контролю зміни НДС РВС.

Проведено апробацію розробленого методу та системи визначення координат стінки РВС за переміщеннями точок її поверхні в польових умовах. Середньоквадратичне відхилення різниці між координатами, визначеними за допомогою розробленої системи та з використанням каретки, становить 1,3 мм.

## Література

1 Заміховський Л. М. Математичне моделювання напружено-деформованого стану вертикальних сталевих резервуарів [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Мартинюк // Наукові вісті Інституту менеджменту і економіки. – 2006. – № 2 (10). – С. 96–100.

2 Седов Л. И. Механика сплошных сред : учеб. пособие : в 2 т. [Текст] / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1984. – 560 с.

3 Richard von Mises. Mathematical Theory of Probability and Statistics [Текст] / Richard von Mises. – New York, Academic Press, 1964. – 694 p.

4 Заміховський Л. М. Оцінка напружено-деформованого стану вертикальних сталевих циліндричних резервуарів за переміщеннями точок їх поверхні [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Паньків // Вісник КДПУ. – 2007. – Част. 1, Вип. 4. – С. 141–143.

5 Заміховський Л. М. Математичне моделювання напружено-деформованого стану вертикальних сталевих резервуарів / Л. М. Заміховський, Х. В. Мартинюк // «Наукові вісті» Інституту менеджменту та економіки «Галицька академія». – 2006. – № 2(10). – С. 96–100.

6 Заміховський Л. М. Математичне моделювання напружено-деформованого стану резервуарів з врахуванням зварних з'єднань [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Паньків // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований». – Одеса, 2007. – Т. 1. – С. 36–40.

7 Самарский А. А. Численные методы [Текст] : учеб. пособие / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.

8 Коцюбівська К. Апроксимація експериментальних даних кубічними сплайн-функціями [Текст] / К. Коцюбівська, В. Ключко, С. Сухоруков, А. Чубатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №3. – 30 с.

9 Nelder J. A. [Електронний ресурс] / J. A. Nelder, R. Mead // Computer Journal. – 1965. – Vol. 7. – Режим доступу : <http://comjnl.oxfordjournals.org/content/7/4/308.full.pdf+html>

10 MATLAB. The Language of Technical Computing. Using MATLAB [Електронний ресурс] / The MathWorks, Inc, 2000. – Режим доступу : [www.mathworks.com/products/matlab/](http://www.mathworks.com/products/matlab/)

11 MATLAB. The Language of Technical Computing. Using MATLAB [Електронний ресурс] / The MathWorks, Inc, 2000. – Режим доступу : [www.mathworks.com/products/matlab/](http://www.mathworks.com/products/matlab/)

12 Exponenta.ru. Образовательный математический сайт [Електронний ресурс] / Softline. – Режим доступу : <http://matlab.exponenta.ru/mltb/default.php>.

13 Метрологія. Резервуари сталеві вертикальні циліндричні. Методика повірки (ГОСТ 8.570–2000. MOD) [Текст] : ДСТУ 4147–2003. – Чинний від 2003–01–01. – К.: Держспоживстандарт. 2003. – 74 с. – (Національний стандарт України).

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
06.06.13*

*Рекомендована до друку  
професором Юрчишином В.М.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Никифорчином О.Р.  
(Прикарпатський національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*